

Philip Knoch  
Beiträge zur zuverlässigen Aufbau- und Verbindungstechnik  
auf flexiblen Glassubstraten für die Hochtemperatursensorik

*DRESDNER BEITRÄGE*  
*ZUR AUFBAU- UND VERBINDUNGS*  
*TECHNIK DER ELEKTRONIK*

Herausgegeben von  
Karlheinz Bock  
Klaus-Jürgen Wolter  
Thomas Zerna

**Band 8**

Philip Knoch

**Beiträge zur zuverlässigen  
Aufbau- und Verbindungstechnik  
auf flexiblen Glassubstraten für  
die Hochtemperatursensorik**

TUD<sub>press</sub>

2024

Die vorliegende Arbeit wurde unter dem Titel „Beiträge zur zuverlässigen Aufbau- und Verbindungstechnik auf flexiblen Glassubstraten für die Hochtemperatursensorik“ am 18.04.2023 als Dissertation an der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Dresden eingereicht und am 06.10.2023 verteidigt.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Andreas Richter  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Karlheinz Bock  
Prof. Dr.-Ing. habil. Mathias Nowottnick  
Weiteres Mitglied: Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Lienig

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek  
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 978-3-95908-646-2

© TUDPress  
Thelem Universitätsverlag &  
Buchhandel GmbH & Co. KG  
Hüblerstr. 26 | D-01309 Dresden  
<http://www.tudpress.de>

TUDpress ist ein Imprint von Thelem.  
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor.  
Printed in Germany.

**Beiträge zur zuverlässigen Aufbau- und  
Verbindungstechnik auf flexiblen Glassubstraten  
für die Hochtemperatursensorik**

Dipl.-Ing.

**Philip Knoch**

der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur**

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Andreas Richter
1. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Karlheinz Bock
2. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Mathias Nowotnick
Weiteres Mitglied:	Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Lienig
Tag der Einreichung:	18.04.2023
Tag der Verteidigung:	06.10.2023

*„Danket dem Herrn;  
denn er ist freundlich,  
und seine Güte währet ewiglich.“*

*Die Bibel, Psalm 107, 1*

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Aufbau und Verbindungstechnik der Elektronik an der Technischen Universität Dresden, finanziert durch das BMBF-Projekt „AllMeSa“ (Förderkennzeichen: 03WKDF4E). Unterstützt wurde ich durch viele Kollegen und Freunde, welchen ich danken möchte. Mein besonderer Dank gilt:

Prof. Karlheinz Bock für die Möglichkeit zur Bearbeitung von diesem interessanten Thema, seine innovativen Vorschläge und Lösungsansätze sowie für die intensive Betreuung beim Anfertigen dieses Schriftstücks.

Dr. Karsten Meier für die produktive Zusammenarbeit, hunderte Diskussionen zu verschiedensten Lösungsansätzen, beeindruckende Geduld beim Erarbeiten von Verbesserungshinweisen zur Dokumentation und seine allzeit bestmögliche Unterstützung bei allen wissenschaftlichen Herausforderungen.

Meinen Kollegen am IAVT für Ihre Geduld und Zuarbeit bei allen Experimenten und Versuchen: Dr. Marco Luniak, Sandra Döring, Ilias Sotiriou, Luise Geppert, Dr. Jörg Meyer, Tobias Tiedje, David Weyers, Victoria Köst, Daniel Ernst und Oliver Albrecht

Den Partnern des AllMeSa-Projekts für die gute Zusammenarbeit und die stets schnelle Lösungsfindung:

- Adenso GmbH: Uwe Beier, Kilian Straube und Ernest Krzyszkowski
- Maria Esche
- SITEC Industrietechnologie GmbH: Dr. Robin Schulze und Christian Endisch
- Sunfire GmbH: Dr. Ludwig Reichel und Maik Grahl

Meinen Kollegen am Fraunhofer IKTS, für ihre Unterstützung bei verschiedensten Versuchen: Dr. Mike Röllig, René Metasch, Dr. Robert Schwerz, Georg Lautenschläger, Dr. Stefan Münch und Dr. Nadja Steinke.

Insbesondere meiner Frau Sophia für die Unterstützung und die Schaffung von Freiräumen zur Erstellung dieser Arbeit. Ich danke auch meiner Familie, meinen Eltern Michael und Doreen Knoch für ihre Unterstützung im gesamten Ausbildungsweg, meinen Geschwistern für Ihre Bestärkung sowie meinen Großeltern für den Tipp, dass ich es in der Forschung versuchen solle.

Allen weiteren, welche mich auf verschiedensten Wegen bei meiner Forschung unterstützt haben: den Mitarbeitern von hplucas aus Freiberg, Dr. Haitham Saleh, Theodor Stuth und Anja Oswald sowie Herrn Uwe Becker der Becker Insulation GmbH für seine Unterstützung. Aber auch allen unterstützenden Studenten: Karl Wichler, Felix Stadermann, Nikolai Kirchner, Yelis Karabacak und Tadas Bieliauskas.

Philip Knoch, Dresden, April 2023

## Kurzfassung

Ultradünne Gläser (engl. **Ultra Thin Glass** – UTG) sind ab einer Glasdicke von 25 µm industriell herstellbar und verfügen über eine mechanische Flexibilität. Außerdem hat Glas in Abhängigkeit der Glassorte das Potenzial, eine gute chemische und thermisch Beständigkeit sowie gute elektrische Eigenschaften zu besitzen, wodurch es als Substratmaterial für die Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik geeignet ist. Derzeit wächst die Anzahl am Markt verfügbarer ultradünner Gläser und durch bereits entwickelte Rolle zu Rolle (R2R) Anlagen ist eine industrielle Verarbeitung von UTG realisierbar.

Um Glas, im Speziellen ultradünnes Glas, in der Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik als Substratmaterial zu nutzen, wird die Anwendung interdisziplinärer Methoden notwendig. Durch die vorliegende Arbeit wird ein Überblick verschiedener Verfahren vorgestellt und ausgewählte Verfahren getestet, welche für die Herstellung von UTG-basierter, hohtemperaturfähiger (HT-fähiger) Schaltungsträger und/oder Sensorik notwendig sind. Abgedeckt wird das gesamte Spektrum beginnend bei der Konfektionierung und Bearbeitung über die Funktionalisierung bzw. die Funktionsschichtabscheidung, die Erzeugung HT-fähiger elektrischer Verbindungen bis hin zur Herstellung und den Test von Demonstratoren in Form von Druck- und Kraftsensoren.



## **Abstract**

Ultra Thin Glasses (UTG) can be produced industrially from a thickness of 25  $\mu\text{m}$  and are mechanically flexible. Furthermore, glass has the potential to have a good chemical and thermic persistence (depending on the type of glass) as well as good electrical characteristics, which makes it interesting as a material to use for the packaging of integrated circuits of electronics. Currently, the amount of ultra-thin glasses on the market is rising and roll to roll systems (R2R) allow an industrial processing of UTG.

For the use of glass, especially ultra-thin glass for the packaging of integrated circuits of electronics, the use of interdisciplinary methods is needed. This thesis will give an overview over different procedures of which some selected ones, that are essential for the production of UGT-based, high-temperature (HT) resistant circuit carrier and/or sensor technology, will be tested. In doing so, the whole range will be covered: from packaging and processing to the functionalisation or functional layer disposition and the creation of HT-capable electrical connection as well as the production and testing of demonstration systems in the form of pressure sensors and force sensors.

# Inhaltsverzeichnis

<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>VII</b>
<b>1 MOTIVATION UND EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
1.1 ANWENDUNG IN HARSH ENVIRONMENT – BRENNSTOFFZELLE – UTG FÜR DIE AUFBAU- UND VERBDINUNGSTECHNIK .....	2
1.2 ABGRENZUNG ZU BEKANNTEN METHODEN DER MESSTECHNIK .....	3
1.3 ZIELEDEFINITION .....	4
<b>2 GRUNDLAGEN</b> .....	<b>5</b>
2.1 GLAS ALS WERKSTOFF .....	5
2.2 VISKOSITÄT IN ABHÄNGIGKEIT DER TEMPERATUR.....	9
2.3 VISKO-ELASTISCHES VERHALTEN .....	11
<b>3 HANDLINGLÖSUNGEN FÜR UTG</b> .....	<b>12</b>
<b>4 BEARBEITUNG VON UTG</b> .....	<b>13</b>
4.1 KONFEKTIONIERUNG.....	13
4.1.1 <i>Untersuchungsmethoden</i> .....	16
4.1.2 <i>Ritzen und Brechen</i> .....	18
4.1.3 <i>LIDE – Laser Induced Deep Etching (LPKF Laser &amp; Electronics SE)</i> .....	19
4.1.4 <i>Konfektionieren durch Vorspannen und Rissinitiiierung</i> .....	20
4.1.5 <i>Sägen mittels Wafersäge</i> .....	21
4.1.6 <i>Ritzen mittels Wafersäge und Brechen</i> .....	22
4.1.7 <i>Laserschneiden</i> .....	24
4.1.8 <i>Vergleich der Methoden</i> .....	40
4.2 TEMPERN .....	44
<b>5 SCHICHTABSCHIEDUNG AUF UTG</b> .....	<b>51</b>
5.1 INKJET.....	51
5.2 DICKSCHICHTTECHNIK.....	53
5.2.1 <i>Siebdruck</i> .....	55
5.2.2 <i>Dickschichtdruck in vorgeläserte Gräben</i> .....	58
5.3 DÜNNSCHICHTTECHNIK.....	59
5.4 ZUSAMMENFASSUNG UND VERGLEICH.....	63
5.5 HYBRIDTECHNOLOGIE.....	64
<b>6 FÜGEN VON UTG</b> .....	<b>69</b>
6.1 FÜGEN MITTELS DICKSCHICHTPASTE.....	69
6.2 LASERGESTÜTZTES GLASLÖTEN .....	72
6.3 ANODISCHES BONDEN.....	73
6.4 WEITERE VERFAHREN .....	75

6.5 ZUSAMMENFASSUNG UND VERGLEICH.....	75
<b>7 ELEKTRISCHE KONTAKTIERUNG .....</b>	<b>77</b>
7.1 STECKKONTAKTE.....	79
7.2 DRAHTBONDEN .....	80
7.3 DICKSCHICHTSINTERN .....	81
7.4 SILBERSINTERN (DRUCKBEHAFTET).....	89
7.5 ZUSAMMENFASSUNG UND VERGLEICH.....	89
<b>8 UTG ALS BASISMATERIAL FÜR HOCHTEMPERATURFÄHIGE SENSORIK.....</b>	<b>91</b>
8.1 SENSORKONZEPTE .....	91
8.1.1 <i>Absolutdrucksensor</i> .....	91
8.1.2 <i>Kraftsensor</i> .....	92
8.1.3 <i>Theoretische maximale Applikationstemperatur</i> .....	92
8.2 VORVERSUCHE.....	93
8.3 TESTEQUIPMENT – DRUCKKAMMER MIT MUFFELOFEN .....	99
8.4 UTG ALS BASISMATERIAL FÜR ABSOLUTDRUCKSENSOREN.....	101
8.5 UTG ALS BASISMATERIAL FÜR KRAFTSENSOREN .....	109
<b>9 ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>111</b>
<b>10 AUSBLICK .....</b>	<b>115</b>
<b>THESEN .....</b>	<b>117</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>119</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>135</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>141</b>
<b>ANHANG – OBERFLÄCHENBEHANDLUNG VON ULTRADÜNNEM GLAS.....</b>	<b>142</b>



# ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AVT	<b>A</b> ufbau und <b>V</b> erbindungstechnik (der Elektronik)
CTE	<b>C</b> oefficient of <b>t</b> hermal <b>e</b> xpansion – dt. thermischer Ausdehnungskoeffizient
DF	Verlustfaktor/ engl.: Dissipation Factor
DK	Dielektrische Konstante
DMS	Dehnungsmessstreifen
HT	Hochtemperatur
ITO	Indiumzinnoxid
LIDE	Laser Induced Deep Etching
MPa	Megapascal
R2R	Roll-to-Roll
RT	Raumtemperatur
S	Standardabweichung
S2S	Sheet-to-Sheet
Tg	Transformationspunkt
UTG	<b>U</b> ltra <b>T</b> hin <b>G</b> lass – dt. ultradünnes Glas
UV	Ultraviolett



# 1 MOTIVATION UND EINLEITUNG

Glas ist ein seit Jahrhunderten bekannter Werkstoff. Die menschliche Glasherstellung begann vor mehr als 4000 Jahren im alten Ägypten [1, 2]. Seit ca. 1902 kann Glas bedingt durch das Fourcault-Verfahren kostengünstig als Fensterglas hergestellt werden [2].

Was qualifiziert den alten Werkstoff Glas im 21. Jahrhundert als Basismaterial für die Aufbau- und Verbindungstechnik – mit Fokus auf Hochtemperaturanwendungen? In der Antwort auf diese Frage liegt die Motivation für die vorliegende Arbeit. Es ist möglich, die Glaseigenschaften beispielsweise durch die Zugabe von verschiedenen Elementen gezielt einzustellen [1, 3]. Angepasst werden kann so der thermische Ausdehnungskoeffizient - CTE (von 0 bis  $15 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), die Glasübergangstemperatur  $T_g$  (welche die maximale Anwendungstemperatur bestimmt), aber auch das Elastizitätsmodul, die Dielektrische Konstante (DK) und der Verlustfaktor (DF – engl. Dissipation Faktor) und die chemische Beständigkeit. Damit ist es grundlegend möglich, Glas der jeweiligen Anwendung anzupassen [2]. Unterschieden wird auch bezüglich der Dicke der Gläser. Ultradünne Gläser (engl. **Ultra Thin Glass** – UTG) sind ab einer Glasdicke von 25  $\mu\text{m}$  industriell herstellbar und verfügen über eine mechanische Flexibilität [4–6], wie exemplarisch in Abbildung 1-1 gezeigt. Durch ein spezielles Verfahren, bei welchem das Glas nach der Herstellung gestreckt wird, ist es bereits heute möglich, auch Gläser mit einer Dicke von 3  $\mu\text{m}$  zu fertigen [7]. Derzeit ist kommerziell eine kleine UTG-Auswahl mit Eigenschaften verfügbar, welche es als Material für die AVT qualifizieren. Beispielsweise sind Gläser mit einem CTE ähnlich dem von Aluminiumoxidkeramik verfügbar, wodurch bereits vorhandene Dickschichtsysteme Anwendung finden können. Mit Blick auf die Literatur und hier verfolgbaren Tendenzen in Forschung und Entwicklung ist von einer wachsenden Anzahl an Anwendungsmöglichkeiten (bsp. als Interposer für elektrooptische Schaltungen etc.) auszugehen. Die dann gesteigerte Nachfrage dürfte den Herstellern auch die Möglichkeit eröffnen, eine breite Produktpalette anzubieten sowie die Chargen zu vergrößern, um Preise zu reduzieren. Ein noch weitestgehend unerforschter Themenkomplex ist die auf UTG basierende AVT, mit Fokus auf Hochtemperaturanwendungen, worin diese Arbeit thematisch einzuordnen ist.



Abbildung 1-1 UTG mit mechanischer Flexibilität [8]

## **1.1 ANWENDUNG IN HARSH ENVIRONMENT – BRENNSTOFFZELLE – UTG FÜR DIE AUFBAU- UND VERBDINUNGSTECHNIK**

Moderne Brennstoffzellen werden bei teils mehr als 800 °C betrieben [9]. Im Rahmen des Projekts „AllMeSa“ (BMBF 03WKDF4E) wurde in einer Kooperation zwischen u. a. der TU Dresden und der Sunfire GmbH untersucht, wie Glas als Basismaterial für sensorische Elemente in Brennstoffzellen genutzt werden kann, um durch die Kenntnis verschiedener Prozessgrößen wie Temperatur, Druck und Strömungsgeschwindigkeit den Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle weiter steigern zu können. Glas und damit auch UTG gilt in der Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik (AVT) als neuartiges Material (im Vergleich zu beispielsweise FR4 oder Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Keramik). Mit dieser Arbeit wird das Ziel verfolgt, einen Überblick über die Möglichkeiten und die Herausforderungen bei der Bearbeitung und Verwendung von UTG mit Fokus auf die AVT und Hochtemperaturanwendungen zu erarbeiten.

Um ein Grundverständnis für das Verhalten des Werkstoffs Glas bei hohen Temperaturen zu schaffen, werden in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen von Glas sowie für die AVT wesentlichen (temperaturabhängigen) Eigenschaften zusammenfassend dargestellt. Alle Versuche in der vorliegenden Arbeit erfolgten im Labormaßstab.

In Kapitel 3 wird der aktuelle Stand der derzeitigen Möglichkeiten zur (groß-) industriellen Verarbeitung von UTG, basierend auf einer Literaturrecherche vorgestellt.

Bei Glas ist die mechanische Bearbeitung von besonderer Bedeutung, da die erreichte Güte (im Sinne des Vorkommens von Rissen und mechanischen Spannungen) einen wesentlichen Einfluss auf die zu erwartende Zuverlässigkeit und Belastbarkeit des entstehenden Substrates hat. Methoden zur händischen und maschinellen Konfektionierung und dem Tempern als thermische Nachbehandlung wurden untersucht und werden in Kapitel 4 beschrieben.

Während erste Methoden zur Metallisierung auf UTG für die Anwendung bei moderaten Temperaturen bereits erforscht wurden [10–13], stellt die Abscheidung funktionaler Schichten für Anwendungstemperaturen von 450 °C und mehr noch eine Herausforderung dar. Bei derartig hohen Temperaturen werden beispielsweise Schutzschichten wie Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> oder Indiumzinnoxid (ITO) notwendig, um metallische Strukturen wie NiCr vor Schädigung zu schützen. Untersuchungen zu verschiedenen Methoden der Funktionalisierung von UTG sind in Kapitel 5 dokumentiert.



Die Zielanwendung von UTG in Form eines Drucksensors macht es im vorliegenden Fall erforderlich, mehrere Substrate miteinander zu verbinden. Aus der Literatur sind hierfür verschiedene Methoden bekannt. Es erfolgte eine Literaturrecherche der unterschiedlichen Ansätze zum Fügen von Glas sowie die experimentelle Umsetzung des Fügens mittels Glasfritte. Ein Überblick der Fügemethoden und der Ergebnisse der durchgeführten Experimente wird in Kapitel 6 dargestellt.

Um die Daten des entstehenden Sensors auslesen zu können, bedarf es einer entsprechenden Verbindung. Es ist denkbar, diese Verbindung künftig auch drahtlos umzusetzen. Im Rahmen dieser Arbeit wird vorerst die elektrische Kontaktierung durch eine mechanische Verbindung untersucht. Vorgestellt werden verschiedene Konzepte zur Realisierung einer elektrischen Verbindung, welche den Ansprüchen der Verwendung bei hohen Temperaturen genügt. Das Dickschichtintern von 25-200  $\mu\text{m}$  dicken Platin- und Reinstnickeldrähten wurde für die elektrische Kontaktierung erster Sensoren gewählt und als Methode untersucht. Die Dokumentation der Konzepte und Versuche ist in Kapitel 7 zu finden.

In Kapitel 8 werden die Konzepte und Versuche zu UTG basierten Absolutdruck- und Kraftsensoren sowie verschiedene Versuche zu den Eigenschaften der aufgebauten Sensoren vorgestellt.

## **1.2 ABGRENZUNG ZU BEKANNTEN METHODEN DER MESSTECHNIK**

Drucksensoren, welche dünne Glasmembranen nutzen, sind in der Literatur bereits bekannt, unterscheiden sich jedoch deutlich von den in dieser Arbeit vorgestellten Konzepten. Bekannt sind beispielweise Versuche, bei welchen zwar Dünnglas als Druckmembran genutzt wird, die Auswertung des Membranhubs jedoch optisch erfolgt [14]. Weiterhin sind ebenfalls UTG-basierte Drucksensoren mit aufgebrauchten Dehnungsmessstreifen (DMS) bekannt [15]. Eine Hochtemperatureignung konnte bei den vorgestellten Aufbauten u.a. aufgrund der verwendeten weiteren Materialien jedoch nicht untersucht werden. Hochtemperaturfähige glasbasierte Drucksensoren sind bereits erforscht, wurden jedoch als mehrere Zentimeter große Bauteile umgesetzt und nutzen keine DMS [16]. Drucksensoren, welche mit DMS arbeiten und HT-fähig sind, wurden bis jetzt aus Silizium [17] oder aus Silizium-Karbid [18] hergestellt. Letztere wurden entwickelt, um bei bis zu 600  $^{\circ}\text{C}$  in Flugzeugturbinen Drücke zu messen und mittels der gewonnenen Daten die Effizienz der Triebwerke zu steigern [18]. UTG-basierte, hochtemperaturfähige Drucksensoren mit einer Dicke von weniger als 400  $\mu\text{m}$  sind bis jetzt nicht bekannt.

### 1.3 ZIELDEFINITION

Angestrebt wird die Identifikation und Untersuchung von Technologien, welche es ermöglichen, UTG als hochtemperaturfähigen Schaltungsträger zu verwenden. Um die Funktionalität der jeweiligen Technologien und deren Zusammenwirken zu prüfen, wird ein Demonstrator in Form eines Absolutdrucksensors aufgebaut und getestet. Des Weiteren wird basierend auf dem Drucksensorkonzept die Umsetzbarkeit eines Kraftsensors getestet. Die Auswahl verschiedener Technologien erfolgt unter Fokus auf die Skalierbarkeit von Laborversuchen auf industrielle Fertigung. Herausforderungen bestehen bei

- der Konfektionierung von UTG,
- der Funktionalisierung im Sinne der Abscheidung funktioneller/elektrisch leitfähiger Schichten,
- dem Fügen mehrerer UTG-Substrate
- und der elektrischen Kontaktierung unter Fokus auf eine Anwendungstemperatur von 450°C.

Durch den zu erarbeiteten Überblick interdisziplinärer Methoden, soll eine Einarbeitung künftiger Forscher im vorliegenden Themenkomplex erleichtert werden.